

УДК 622.272

В.В. Мельник, Л.И. Шулятьева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШАХТ

Обоснована необходимость и предложен метод поэтапной оптимизации параметров технологических схем на основе формирования сбалансированного математического аппарата для выбора рациональных вариантов проектных решений. Ключевые слова: рациональные параметры, поэтапная оптимизация, технологическая схема, шахтовариант, математическая модель, технико-технологический потенциал.

Семинар № 16

V.V. Melnik, L.I. Shulyatyeva
**THE IMPLEMENTATION OF THE
PHASE-BY-PHASE OPTIMIZATION OF
THE PARAMETERS OF THE
TECHNOLOGICAL SCHEMES DURING
MINE DESIGNING**

There have been grounded the necessity and presented the method of sequential optimization of technological schemes parameters on the basis of forming balanced mathematical apparatus to choose rational variants of design decisions.

Key words: rational parameters, phase-by-phase optimization, technological scheme, mine variant, mathematical model, technical and technological capacity

Широкий диапазон горно-геологических и горнотехнических условий разработки угольных пластов - важнейшие факторы, определяющие выбор проектных решений, которые представляют собой сочетание технологических схем подготовки и отработки пластов. Многообразие этих условий определяет необходимость формирования технологической схемы шахты путем совместной оптимизации параметров технологических схем и параметров технологических процессов подземной угледобычи.

В зависимости от целей исследования и решаемых при этом задач в большинстве научных работ используется системный анализ, определяемый как методология решения геотехнологических проблем, основанный на теории сложных систем, то есть на системном подходе к их изучению путем установления логических и количественных взаимосвязей между отдельными подсистемами и их элементами с целью формирования алгоритма ее реализации на различных этапах проектирования. При этом под этапом проектирования понимается «период времени, в течение которого вырабатывают определенную, достаточно большую часть шахтного поля, имеющего пространственно естественные или условные границы» [1]. На основе этого создавались самостоятельные аналитические аппараты:

- с целью обоснования экономически целесообразных технологических схем, их пространственных и конструктивных параметров,

- с целью оптимизации параметров технологических схем отдельных процессов подземной угледобычи,

в которых обоснование выбора технологических схем и их параметров осуществлялось с использованием сред-

небассейновых или среднеотраслевых нормативов параметров технологических процессов, а обоснование параметров технологических процессов – с использованием нормативных параметров технологических схем, что приводило, и в том, и в другом случае, к созданию статических моделей, решающих ограниченный круг задач. При обосновании рациональных вариантов ТС вскрытия и подготовки, а также ТС процессов подземной угледобычи использовались либо стоимостные среднеотраслевые параметры, либо регрессионные модели затрат, полученные на основе обработки статистической информации. Несовершенство математических моделей, которые в большей степени носили статический характер, ограничивало сам процесс обоснования выбора и приводило к необходимости разработки механизма оптимизации для конкретной задачи исследования.

Использование методов поэтапного проектирования и последовательной оптимизации [1] упрощают процедуру оптимизации основных элементов технологической схемы шахты.

Параметры схем подготовки и систем разработки не только ограничены условиями горно-геологического залегания пластов, но и их оптимальные значения зависят от параметров технологических процессов. Так, длина очистного забоя в значительной степени зависит от скорости его подвигания, которая, в том числе, определяется производительностью технических средств по выемке, транспортированию угля. Поэтому обоснование рациональных параметров технологических процессов требует разработки такого единого механизма их формирования и совместной оптимизации, который позволил бы увязать их в единую систему, определяющую в дальнейшем параметры основных элементов технологической схемы шахты. Это обеспечивает более эффективную реализацию идеи последовательной оптимизации технологиче-

ской схемы шахты и поэтапного проектирования её долгосрочного развития. Тогда шахта должна быть представлена как сложная технологическая система, формируемая путем оптимального сочетания взаимоувязанных подсистем, которые в свою очередь могут рассматриваться как сложная технологическая взаимосвязь составляющих ее подсистем второго порядка [4].

Оптимизация технологических схем шахт и их пространственно-временного развития производится в несколько этапов:

- I этап: моделирование параметров технологических процессов подсистем шахты по рассматриваемым вариантам принятых к исследованию технологических схем, обоснование допустимых минимальных и максимальных числовых значений этих параметров;

- II этап: совместная оптимизация параметров технологических процессов подсистем шахты, обоснование границ их варьирования;

- III этап: формирование технологических схем подсистем и шахты в целом и их экономическая оценка с учетом принятых ограничений.

На первом этапе, с использованием разработанных моделей формирования управляемых параметров технологических процессов шахты, осуществляется оценка технологических решений её подсистем путем определения предельных границ варьирования этих параметров. Использование пакета прикладных программ, позволяющих реализовать модели формирования параметров технологии с использованием базы данных шахты, содержащей горно-геологическую информацию, а также информацию о движении и использовании технических средств и применяемых технологических схем на процессах угледобычи, обеспечивает в дальнейшем их совместную оптимизацию с высокой степенью точности расчетов.

На втором этапе, путём синтеза моделей подсистем и введения ограничений, обеспечивающих тот или иной вариант формирования технологической схемы шахты в пространстве и во времени, определяются границы варьирования параметров технологических процессов. Так, по каждой подсистеме шахты разработаны модели оптимизации их параметров, установлена их взаимосвязь с параметрами других подсистем. Это позволяет, на основе агрегирования этих моделей, осуществить совместную оптимизацию, которая заключается в обозначении границ совместного варьирования управляемых параметров технологических процессов, оказывающих прямое или косвенное влияние на формирование технологической схемы шахты.

Предложенная модель поэтапной оптимизации представляет собой сбалансированный математический аппарат обоснования рациональных технологических схем, позволяющий осуществлять целенаправленное регулирование и управление развитием добычи угля на шахте, действующей как производственная единица угледобывающего предприятия, с учётом динамики спроса на угольную продукцию определенного качества, решать проблему повышения эффективности инвестиционных проектов в временной динамике. Кроме того, попутно может быть решен ряд важных народнохозяйственных задач, таких как эффективность использования природных ресурсов, прогнозирование развития отрасли в целом в условиях становления рыночных отношений.

Идея моделирования и оптимизации параметров подсистем основывается на формировании объемов добычи угля на момент оптимизации варианта развития шахты t и на весь период оптимизации T с учётом развития процесса угледобычи в пространстве и во времени. Цель - формирование технологической схемы шахты, обеспечивающей оптимальные параметры технологических

схем вскрытия и параметров технологических процессов - достигается путём обоснования области их совместного варьирования, в пределах которой осуществляется их совместная оптимизация в рассматриваемый период развития шахт $T = t_m - t_0, (t \in T)$, осуществляемая в двух направлениях:

1. Обеспечение спроса на угольную продукцию i -й шахты - выполнение условия:

$$\left[\sum_{t=t_0}^{t_m} \left(\sum_{j=1}^{M(T)} D_{ij} + \sum_{l=1}^{L(T)} D_{np_{il}} - R_{ii} \right) \right] \geq 0 \quad (1)$$

где i - индекс шахты, $i=1,2,\dots,n$; j - индекс очистного забоя, $j=1,2,\dots,m$; t_0 - начало периода T ; t_m - его конец; t - момент оптимизации варианта периода оптимизации T ; D_{ij} - расчётная нагрузка на j -й очистной забой в момент времени t ; R_{ii} - обеспечиваемый спрос на рынке угольной продукции i -й шахтой в момент времени t , тонн; $D_{np_{il}}$ - добыча угля из подготовительного забоя l -й выработки по i -й шахте в момент времени t , т.

Расчетное количество одновременно действующих очистных забоев в момент времени t , обеспечивающих обслуживаемый i -й шахтой спрос:

$$\{m_t\} - m_{poz_{ii}} \rightarrow \min$$

при условии, что

$$R_{ii} - \sum_{j=1}^{m=m_t} D_{ij} + \sum_{l=1}^L D_{np_{il}} \leq 0, \quad (2)$$

Общее количество очистных забоев, действующих по i -й шахте в период оптимизации T должно обеспечивать условие:

$$\{M(T)_i\} - M_{poz}(T)_i \rightarrow \min$$

при условии, что

$$R(T)_i - \sum_{t_0}^{t_m} \left(\sum_{j=1}^{M(T)} D_{ij} + \sum_{l=1}^{L(T)} D_{np_{il}} \right) \leq 0 \quad (3)$$

2. Обоснование технико-технологического потенциала шахты (максимальный объёма угледобычи)

$$t_m^{(M(T))} \left(\sum_{j=1}^L D_{ij} + \sum_{l=1}^{L(T)} D_{np_{il}} \right) \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$m = m_i \sum_{j=1}^L D_{ij} + \sum_{l=1}^L D_{np_{il}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

при ограничении

$$m_{роз_{ii}} - \{m_i\} \leq 0$$

Дано обоснование временного ресурса отработки выемочного поля (столба), который определяет границы, в которых, при проектировании и планировании развития горных работ, допустимо варьирование управляемых параметров технологических процессов других подсистем. Разработана модель пространственно-временной динамики развития очистных и подготовительных работ, в которой, в привязке к ТС подготовки и отработки выемочного поля, обоснована пространственно-временная последовательность отработки выемочных столбов. Модель является основой для привязки технологических моделей дегазации, монтажно-демонтажных работ и внутришахтного транспорта.

Модель выбора оптимальных параметров технологии подсистем «очистные работы» и ГПР имеет вид:

для всех $l \in z, z \in j$ необходимо выполнение условия

$$T_{подг_{ij}} - T_{экс_{ij-1}} \rightarrow \min,$$

при условии

$$D_{ii} - R_{ii} \leq 0; D_{см_{ij}} - D_{см_{ij}}^{эф} \leq 0;$$

$$m_{ii} - m_{роз_{ii}} \leq 0;$$

$$\frac{\sum_{l=1}^m A_{ij}^c \times D_{ij}}{D_{ij}} - \bar{A}_{ii}^c \leq 0;$$

$$V_{np_{il}}^{nl} - V_{np_{il}}^{эф} \leq 0;$$

$$V_{np_{il}}^{nl} - V_{np_{il}} \leq 0 \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{L_{il}}{V_{np_{il}}} + t_{рmil}^{n3} + t_{рdil}^{n3}}{\max\{T_{np_{ik}}\}} - m_{n3}^{mc} \leq 0,$$

$$m_{n3} \leq N_{об_{ii}}^{np},$$

где z - индекс сети выработок по подготовке выемочного поля (столба);

$T_{подг_{ij}}$ - продолжительность подготовки j -го выемочного поля (столба),

$$T_{подг_{ij}} = \tau_{подг_{ij}} - \tau_{подг_{ij}}^0, \quad (7)$$

$T_{экс_{i,j-1}}$ - продолжительность эксплуатации $j-1$ -го выемочного поля (столба);

$$T_{экс_{ij-1}} = \tau_{экс_{ij-1}} - \tau_{экс_{ij-1}}^0, \quad (8)$$

$\tau_{подг_{ij}}^0, \tau_{подг_{ij}}$ - момент времени соответственно начала и окончания подготовки j -го выемочного столба; $\tau_{экс_{ij-1}}^0,$

$\tau_{экс_{ij-1}}$ - момент времени соответственно начала и окончания эксплуатации $j-1$ -го выемочного столба; A_{ij}^c, \bar{A}_{ij}^c - соответственно фактическая и планируемая

зольность угля, %; $N_{об_{ii}}^{np}$ - количество

проходческого оборудования на шахте в момент t ; m_{n3}^{mc} - возможное количество

во одновременно действующих подготовительных забоев, ограниченное условиями технологических схем подготовки.

$\bar{V}_{np_{il}}, V_{np_{il}}, V_{np_{il}}^{эф}$ - соответственно оптимальная в момент времени t , максимально возможная и ограниченная газоносностью скорости проведения l -й выработки; $t_{рmil}^{n3}, t_{рdil}^{n3}$ - продолжительность

соответственно монтажа и демонтажа оборудования в подготовительном забое.

Таблица 1

Матрица формирования затрат на добычу угля по шахте

Участки и цехи	Элементы затрат					
	материалы	Зараб. плата	амортизац.	электроэнер	Прочие	Всего
A	1	2	3	4	5	6
Очистные работы (S1)	Z1-1	Z1-2	Z1-3	Z1-4		Z1-6
Подготовительные работы (S2)	Z2-1	Z2-2	Z2-3	Z2-4		Z2-6
Внутришахтный транспорт (S3)	Z3-1	Z3-2	Z3-3	Z3-4		Z3-6
Ремонт горных выработок (S4)	Z4-1	Z4-2	Z4-3	Z4-4		Z4-6
Шахтный подъем (S5)	Z5-1	Z5-1	Z5-1	Z5-1		Z5-1
Вентиляция горных выработок (S6)	Z6-1	Z6-2	Z6-3	Z6-4		Z6-6
Монтаж-демонтаж оборудования в шахте (S7)	Z7-1	Z7-2	Z7-3	Z7-4		Z7-6
Прочие участки и цехи (S8)	Z8-1	Z8-2	Z8-3	Z8-4	Z8-5	Z8-6
Дегазация шахты (S9)	Z9-1	Z9-2	Z9-3	Z9-4		Z9-6
Административно-бытовой комплекс (S10)	Z10-1	Z10-2	Z10-3	Z10-4	Z10-5	Z10-6
Общешахтные расходы (S11)			Z11-3	Z11-4	Z11-5	Z11-6
Производственная себестоимость (S)	Z12-1	Z12-2	Z12-3	Z12-4	Z12-5	Z12-6

В соответствии с предложенной моделью разработан алгоритм последовательности поиска их оптимальных соотношений, на основании чего устанавливаются области совместного варьирования этих параметров - минимаксные их значения. Определяются варианты развития очистных и подготовительных работ, которые в дальнейшем принимаются к оптимизации. На основании сформированных таким образом параметров подсистем очистных и подготовительных работ формируются параметры подсистем: дегазация пластов, вентиляция, ремонт горных выработок, а также ВШТ: количество (S_{mc_i}) и протяжённость ($L_{mc_{is}}$, $s=1,2,\dots,S$) транспортных цепочек, их грузопоток момент времени t ($Q_{mc_{is}}$) в соответствии с её типом, определяемым набором оборудования и видом транспортируемого груза.

На III этапе производится формирование технологических схем подсистем и шахты в целом и их экономическое обоснование с учетом принятых ограничений. Далее осуществляется разработка вариантов развития угледобычи

на шахте и их экономическое обоснование на основе предложенной технологико-экономической модели оптимизации. Затем эти варианты представляются в качестве исходной информации для оптимизации вариантов комплексного развития шахт в составе угледобывающей компании. Такой метод-подход предполагает сопоставимость результатов расчетов по отдельным шахтам при разработке единой стратегии развития компании.

Технологико-экономическая модель шахты, представляет собой синтез технико-технологической и экономико-математической моделей. Формирование экономико-математической модели основано на использовании расчетно-аналитического метода моделирования затрат по их элементам и процессам угледобычи [3]. Расчёт затрат по каждому элементу подсистемы шахты осуществляется в зависимости от параметров её технологических схем и процессов. Общая схема формирования технологико-экономической модели шахты представлена матрицей затрат, приведенной в табл. 1.

Согласно матрице общие затраты по шахте в момент времени t (Ct)

$$C_t = \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C Z_{trc}, \quad (9)$$

где r - индекс подсистемы шахты, $r = 1, 2, \dots, R$; c - индекс элемента затрат подсистемы, $c = 1, 2, \dots, C$; Z_{trc} - сумма затрат по r -й подсистеме, c -му элементу затрат в момент времени t , ден.ед., определяется в зависимости от S_{trk}

$$Z_{trc} = \{S_{tr1}, S_{tr2}, \dots, S_{trk}\}, \quad (10)$$

где k - индекс параметра технологии подсистемы, $k = 1, 2, \dots, K$; S_{trk} - параметр технологического процесса r -й подсистемы в момент времени t .

На основании проведенных исследований дано технолого-экономическое обоснование оптимальных вариантов проектных решений и дальнейшего развития шахты, в том числе:

- обоснование выбора варианта развития (новое строительство, реконструкция на поддержание или прирост мощности) шахты на основе оптимизации параметров её технологических процессов и подсистем при условии обеспечения обслуживаемого спроса на производимую угольную продукцию;

- обоснование технико-технологического потенциала шахты в условиях самообеспечения финансовыми ресурсами в рамках угледобывающего предприятия или привлечения внешних инвестиций.

- обоснование и оценка новых технико-технологических решений вскрытия, подготовки и отработки запасов, позволяющих поддерживать высокоэффективное производство с минимальными затратами.

Для оценки эффективности инвестиционной политики предприятия, с учётом сроков окупаемости, введён параметр их временной оценки, что обеспечивает набор вариантов развития шахты в заданных временных пределах

возврата инвестиций. Общий вид технолого-экономической модели оптимизации вариантов развития шахты представлен следующим образом:

Для $R = 0$

$$\sum_{t=t_0}^T (Q_{\partial_{ii}} + P_{\partial_{\tau_m, i}}) \rightarrow \min$$

$$\tau_{m_i} - t_{0_i} \rightarrow \min \quad (11)$$

$$\left[\sum_{t=t_0}^{tm} \left(\sum_{j=1}^{M(T)} D_{ij} + \sum_{l=1}^{L(T)} D_{np_{il}} \right) \right] \rightarrow \max \cdot$$

Для $R \neq 0$

$$\left[\sum_{t=t_0}^{tm} \left(\sum_{j=1}^{M(T)} D_{ij} + \sum_{l=1}^{L(T)} D_{np_{il}} - R_{ii} \right) \right] \geq 0 \quad (12)$$

где $Q_{\partial_{ii}}$ - затраты шахты на реализацию варианта без учета амортизации основных фондов, ден.ед.,

$$Q_{\partial_{i,i}} = C_{ii} - Cau_{ii}, \quad (13)$$

где Cau_{ii} - амортизационный фонд шахты в момент времени t , ден.ед.

В качестве дополнительного ограничения введено ограничение размера инвестиций на развитие угледобычи величиной $P_{\partial_{\tau_m, i}}$

$$P_{\partial_{\tau_m, i}} - P_{\partial_{\tau_m, i}} \leq 0, \quad (14)$$

при этом может быть принят частный случай, когда

$$P_{\partial_{\tau_m, i}} - \sum_{t_0}^{\tau_m} Cau_{ii} \leq 0 \quad (15)$$

Предложенная модель поэтапной оптимизации представляет собой сбалансированный математический аппарат для целенаправленного регулирования и управления развитием горных работ и добычей угля на шахте, действующей как производственная единица угледобывающего предприятия, с учётом динамики спроса на угольную продукцию определенного качества.

Рассматривая угледобывающую компанию как совокупность совместимых систем, представляющих собой сложный комплекс технологических процессов шахт, использованы свойства сложной, целостной системы, основным из которых является совместная оптимизация вариантов развития шахт. При этом их производственная деятельность должна быть направлена на получение максимальной выгоды в пределах всей компании. Так как шахты, входящие в состав компании, не имеют финансовой самостоятельности, то в рамках этой системы возможно перераспределение материально-технических и финансовых ресурсов с целью повышения общей эффективности их использования. Модель решает проблему рационального использования потенциала входящих в её состав шахт на стадии проектирования в рамках целостной системы. Формирование функции цели в модели оптимизации проектных решений действующих и строящихся шахт, располагающих определенными запасами угля, основными фондами и трудовыми ресурсами основано на формализации расчета чистого дохода компании за весь период оптимизации, с учётом наращивания на конец реализации для определения будущей стоимости варианта. Периодом оптимизации варианта развития шахт (Т), составляющих единую технологическую и экономическую систему, может рассматриваться период времени между началом (t_0) и окончанием (t_m) внедрения выбранного варианта, например, началом строительства нового горизонта и окончанием его эксплуатации.

Общий вид модели оптимизации вариантов:

$$B_{\partial_{t_m}} - Q_{\partial_{t_m}} - P_{\partial_{\tau_m}} \rightarrow \max$$

$$\tau_m - t_0 \rightarrow \min$$

при условии, что для любых t

$$\sum_{i=1}^n D_{ii} - \sum_{i=1}^n R_{ii} \geq 0, \quad (16)$$

$$-\sum_{i=1}^n Q_{\partial_{t_i}} + \sum_{i=1}^n B_{\partial_{t-1,i}} - H_{\partial_{t-1}} \geq 0,$$

где $H_{\partial_{t-1}}$ - налоги и другие обязательные платежи в бюджет, с учётом наращивания их на момент времени $t-1$, ден.ед; τ_m - момент погашения кредита; $B_{\partial_{t_m}}$ - выручка с учётом наращивания на момент времени t_m , ден.ед.; $Q_{\partial_{t_m}}$ - затраты с учётом наращивания на момент времени t_m , ден.ед.; $P_{\partial_{t_m}}$ - заёмные средства с учётом наращивания, ден.ед.; i - индекс шахты угледобывающего предприятия, $i=1 \dots n$; R_{ii} - объем реализации угля по i -й шахте в момент времени t .

Предложенная модель поэтапной оптимизации представляет собой сбалансированный математический аппарат обоснования рациональных технологических схем, позволяющий осуществлять целенаправленное регулирование и управление развитием добычи угля на шахте, действующей как производственная единица угледобывающей компании, с учётом динамики спроса на угольную продукцию определенного качества, решать проблему повышения эффективности инвестиционных проектов в временной динамике. Кроме того, попутно может быть решен ряд важных народнохозяйственных задач, таких как эффективность использования природных ресурсов, прогнозирование развития отрасли в целом в условиях становления рыночных отношений.

Задача может быть усложнена тем, что один из управляемых параметров вектора, характеризующего вариант, может быть представлен в виде изменяющейся, в определённых пределах, переменной. А так как изменение одной из составляющих вектора часто приводит к изменению другой, предлагается обозначить их все либо постоянными числовыми значениями, либо ус-

тановить область их определения с фиксированными минимумами и максимумами как дискретный ряд чисел. Это должно быть определено на уровне разработки шахтовариантов.

Процедура определения оптимума заключается в том, чтобы, двигаясь от

границ, в сторону увеличения или уменьшения, в зависимости от принятого знака неравенства, найти оптимальное соотношение шахтовариантов. Принятие решения осуществляется путём проверки выполнения всех условий поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малкин А.С., Пучков Л.А., Саламатин А.Г., Еремеев В.М. Проектирование шахт: Учебник для вузов. Под ред. Л.А. Пучкова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. Академии горных наук, 2000. – 375 с.: ил.

2. Пучков Л.А., Михеев О.В., Сенкус В.В., Атрушкевич В.А. Системный анализ технологий подземной добычи угля. – М.: Изд. Академии горных наук, 2000. – 148 с.: ил.

3. Шулятьева Л.И. Техничко-технологические проблемы оптимального комплексного развития угледобывающих предприятий. - Уголь, № 9, 2004.-с.51-60

4. Мельник В.В., Шулятьева Л.И. Совершенствование теории и методов оптимизации параметров технологических схем шахт для разработки стратегии развития угледобывающих предприятий. – Тезисы к конференции. День горняка 2008 г. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Мельник В.В. – доктор технических наук, зав. кафедрой ПРГПМ,
Шулятьева Л.И. – кандидат технических наук, докторант кафедры ПРГПМ,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ШАХТИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) ЮЖНО=РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА (НПИ)			
ГОЛОДОВ Максим Александрович	Обоснование параметров короткозабойных технологий отработки отработки околоствольных целиков с закладкой выработанных пространств	25.00.22	к.т.н.